

高功率微波武器对弹道导弹爆高引信作用分析

冯延彬^{1,2}, 李国林¹, 路翠华¹, 于静¹

(1. 海军航空工程学院, 山东 烟台 264001; 2. 第二炮兵工程大学士官学院, 山东 青州 262500)

摘要: 高功率微波武器(HPMW)对爆高无线电引信的作用的能量耦合以天线耦合为主。选择引信天线与高功率微波(HPM)耦合产生的感应电压为引信内部电路毁伤模型的主要判断依据,感应电压与具体电路的结合可以判定HPMW的毁伤效果。仿真结果表明:1 GW的同频HPMW在1000 m高度以内,完全具备烧毁接收机前端器件的电压条件,可以造成无线电引信失效。

关键词: 高功率微波武器(HPMW); 反导; 弹道导弹; 无线电引信

中图分类号: V271.4; TN97 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-637X(2013)11-0034-04

Effect of High Power Microwave Weapons on Radio Fuze of Ballistic Missiles

FENG Yanbin^{1,2}, LI Guolin¹, LU Cuihua¹, YU Jing¹

(1. Naval Aeronautical and Astronautical University, Yantai 264001, China;

2. Petty Officer College, The Second Artillery Engineering University, Qingzhou 262500, China)

Abstract: The energy coupling of effects of High Power Microwave Weapon (HPMW) on radio fuze is mainly antenna coupling. The induced voltage of high power microwave on fuze antenna was chosen as criterion for the damage simulation model. Parameters of fuze electric components and circuits were also taken into account, which could be used for evaluating the destruction effect of the HPMW. The simulation results show that: within height of 1000 meters, the 1 GW coincidence HPMW can achieve the voltage to destroy the receiver and cause radio fuze failure. The result also shows that the method is feasible.

Key words: high power microwave weapon; anti-missile; ballistic missile; radio fuze

0 引言

高功率微波武器(HPMW)是武器技术发展的一次质的飞跃,与雷达、红外等侦察手段配合,通过发射高频、高功率微波脉冲,对飞行中的各种导弹、无人机等进行电子攻击,达到摧毁或使其失效的效果,实现高效反导作战。在HPMW反导作战引信部分的研究中,多是全系统实验和从HPMW方面的定性研究^[1-2]。在定量研究中,针对单个器件或组件进行过大量的实验,获得了单个器件或组件的数据^[3]。但这些数据难以用于对无线电引信等导弹控制系统毁伤判断,缺少可行的、具备说服力的能量计算方法^[4-5]。这一现象的主要原因:一是对HPMW性能没有具体的、清晰的概

念;二是对目标系统中的高功率微波作用器件的接收与消耗的能量缺少分析与计算。随着HPMW的部署,为进一步研究HPMW对引信的毁伤机理,首先要确定HPMW和无线电引信系统,为方便研究,以弹道导弹用于确定爆炸高度的无线电引信为研究对象,结合英国BAE系统公司HPMW,以天线仿真为主要的分析方法,确定HPMW对爆高无线电引信的硬件毁伤效果模型。

1 HPMW性能指标分析

HPM信号具有瞬间功率大、窄带、能量相对集中(90%的能量分布在带宽内)的特点,属于规律性重复脉冲。脉冲宽度在作战情况下一般为100 ns左右,信号重复率为1 Hz~1 kHz。

英国BAE系统公司在高功率微波源及微波武器的研究、生产方面具有世界级水平。它把激光技术和微波技术相结合,使新的源功率大大超过以往的功率极限,并减少了体积与成本。

2008 年,BAE 系统公司推出了一个可机动、多用途、紧凑型的全集成的 HPMW。在 BAE 系统公司网站上可以看到其名为 Bofors HPM Blackout,功率为 GW 级,长度小于 2.5 m,天线孔径有 3 种,分别为 0.6 m、0.8 m、0.9 m。天线增益为 10~25 dB,系统由于采用电池供电,使其可以部署于各种地形。图 1a 为 Bofors HPM Blackout 实物,图 1b 为其尺寸图。

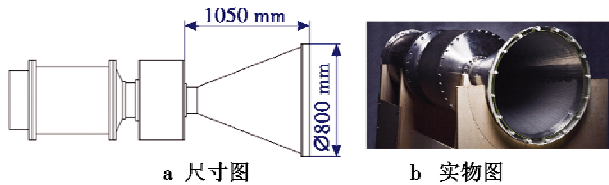


图 1 Bofors HPM Blackout 的尺寸与实物图

Fig. 1 Bofors HPM Blackout

采用 ansoft 软件进行仿真,得到平面辐射图见图 2。

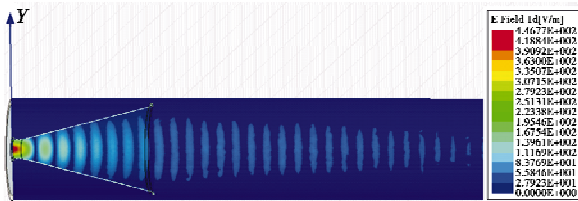


图 2 0.9 m 天线的平面辐射图

Fig. 2 Plane radiation pattern of antenna

由于频率最高孔径最大时增益最大,0.9 m 天线的增益为 25 dB,频率为 4.5 GHz,发射功率按 1 GW 计算得到图 3,为 Bofors HPM Blackout 的 HPMW 400 m 内的目标处功率密度。

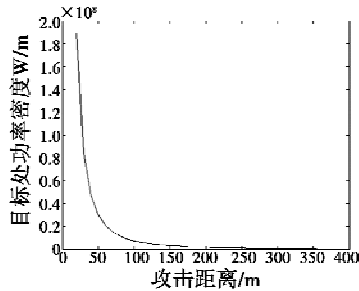


图 3 BHB 功率密度与距离的关系

Fig. 3 The relationship between BHB power density and distance

2 HPMW 攻击模型

HPM 照射到无线电引信上产生毁伤效应,包括辐射、耦合和器件毁伤 3 个过程。其耦合过程主要是 HPM 经由导弹天线耦合进入导弹内部。HPMW 最终能否对电子系统造成毁伤效应,关键取决于天线“耦合”到电子系统中电磁能量密度的大小。

HPM 对电子系统的破坏和干扰效应实际上是其对电子系统中某些关键、敏感器件的结构损坏或者使

其工作状态发生改变^[6]。其攻击因子包括电流、电压、功率、正向电压的上升率 du/dt 等,如图 4 所示。

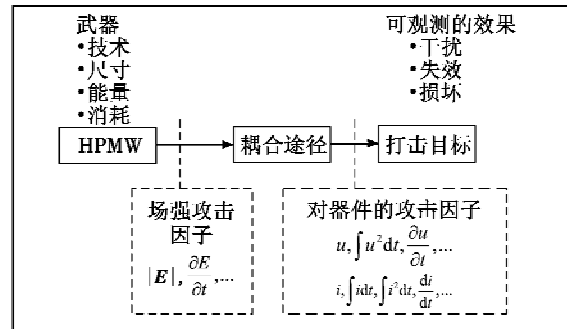


图 4 高功率微波武器攻击模型

Fig. 4 HPMW's attack model

对电子系统的破坏最终体现在对元器件的毁伤,毁伤方式主要分为热毁伤和电压击穿两种。

热毁伤是指攻击过程中,受攻击元器件中产生热量且不能有效地散出,导致元器件损坏。一般出现在连续波焦耳加热或者脉冲持续时间长于 100 ns 的情况^[7]。其特征是低电压、高电流。热使半导体器件的结温度升高最后把结融化,器件失效。散热很快,为 10 ns 级^[8]。

电压击穿是一种绝热过程。电压击穿有时可称为电流模式击穿,一般是在纳秒或皮秒量级完成。强电压可以使 MOS 电路的栅氧化层或金属线间造成介质击穿,致使电路失效,如 MOS 管极易遭受带静电物体或高电压的电子轰击而损坏,即使是很小的电流,其主要原因是栅极通道上氧化绝缘层太薄。电压击穿是作用于 HPM 毁伤的初始阶段,是热毁伤必须的第一反应过程。

3 引信中 HPMW 效应物分析

无线电引信是导弹武器系统的效能倍增器,由大量的电子器件构成,因而是 HPMW 实现毁伤的最合适的目标装备。

对地导弹除天线外,高功率微波没有其他途径进入引信内部,引信设备的电路均封装于具有良好屏蔽性能的多层金属腔体内,因而可以不考虑“后门”作用。因此,HPM 对无线电引信的攻击以天线为主。

对地导弹引控系统一般采用无线电定高装置判定弹头的再入高度。选择其作为研究对象,主要是因为 HPMW 发出的 HPM 可以从其天线的主瓣进入,而 HPMW 对其他导弹的攻防天线关系较复杂。图 5 为引信接收机前端采用的器件框图。由于无线电引信的作用距离小,其辐射功率小、灵敏度低、抗干扰措施简陋、线路简单。

微波能量耦合到引信中,烧毁接收设备的前端器件,如转换开关、混频器、限幅器等,这些是引信主要的

前端组件, PIN 微带电路基本样式如图 6 所示^[9]。

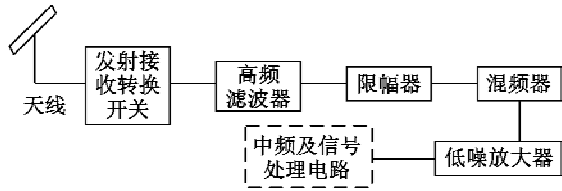


图 5 引信前端器件框图
Fig. 5 Fuze front-end device diagram

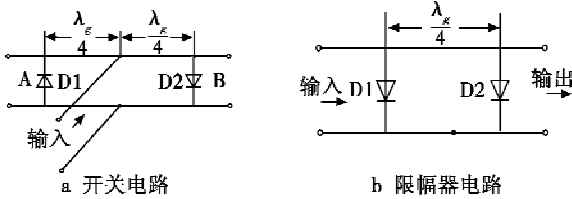


图 6 PIN 微带电路的基本样式
Fig. 6 The basic style circuits of PIN

PIN 管的损坏同样有热烧毁和反向击穿两种可能。热烧毁出现在连续波加热或者脉冲持续时间大于 $0.1 \mu\text{s}$ 的情况。PIN 管导通时,微波开关的功率容量主要受限于 PIN 管所允许的最大功耗;PIN 管截止时,功率容量的限制因素是反向击穿电压^[10]。

SMP1352-005AI 公司 PIN 二极管(如图 7 所示)是一种双管反向并联 PIN 管,其击穿电压 $V_R = 200 \text{ V}$ 。Infneon 公司的 FRD 型号为 SDP06S60,反向击穿电压 $V_R = 600 \text{ V}$ 。假设引信使用的是以上型号。

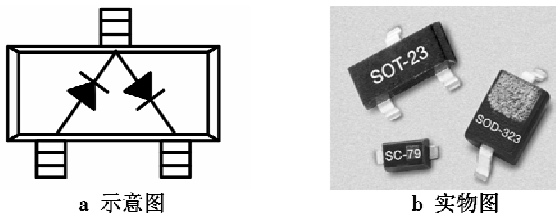


图 7 SMP1352-005 型 PIN 管
Fig. 7 SMP1352-005 type PIN

4 仿真与计算

首先,根据无线电引信的原理,建立高功率微波与无线电引信前门毁伤效应模型,分析方法将以 HPMW 在引信天线产生的感应电压为依据,HPMW 依靠前门作用实施攻击时,有针对性地选择频段,将引信工作频段包括进去,天线具有选择性,频段不对,攻击信号将被大幅度衰减;其次,根据其空间位置不同,判断能量能否从引信天线主瓣波束进入;再次是确定导弹与 HPMW 的相互距离,仿真其反向电压;最后,根据感应电压确定电子器件的毁伤情况,超过击穿电压即引起毁伤。

为简化仿真,将最靠近天线的微波发射与接收开关作为研究对象,模型主体是引信天线模型,在此采用四元微带贴片天线阵进行设计,由 Agilent EMPro2011

进行建模仿真。图 8 所示为四元贴片引信天线的结构图和安装示意图。

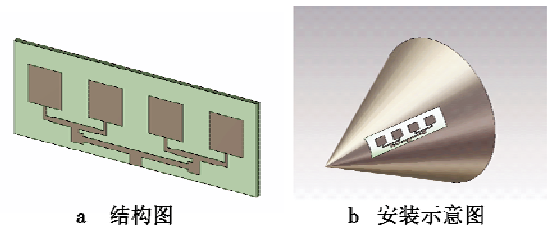


图 8 四元贴片引信天线
Fig. 8 The four patch antenna for fuze

采用 CST 软件分析该天线,获得如图 9 所示的引信天线远场分布图共形图,可见,该引信天线主瓣宽而尖。

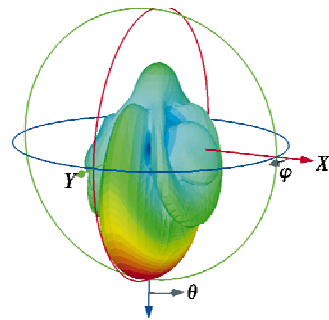


图 9 引信天线远场分布图共形图
Fig. 9 Fuze antenna far field distribution

图 10 为天线表面上的电场分布图。电场以中心位置向两端呈对称分布,且电场强度由中心向两端呈衰减状态,腔体中心位置出现了场增强效应。

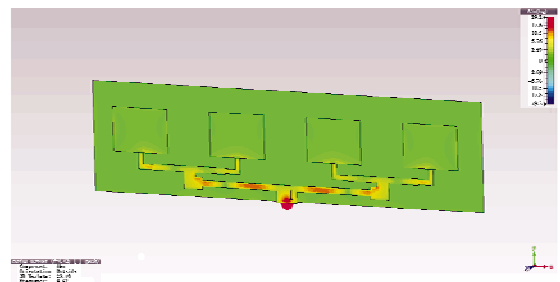


图 10 天线平面电场分布图
Fig. 10 The plane distribution of antenna

为获得天线对不同频率 HPM 的选择效果,入射高功率微波采用圆极化高斯脉冲平面波,垂直于贴片天线平面辐照导弹无线电引信天线。入射波电场强度设为 1 V/m 。图 11 显示了入射场强为 1 V/m 法向照射,不同频率情况下的天线感应电压。

由图 11 知频率为 4.5 GHz ,场强为 1 V/m 法向照射时,天线产生的感应电压约为 0.02 V 。当场强变化时,感应电压以线性变化。当场强为 1 kV/m 时,感应电压约为 20 V 。

反导 HPMW 的波束能够从主瓣进入天线,进入系统的电压或电流由于系统内部存在的电缆、转接器、滤

波器而衰减。对器件的毁伤判断还需结合具体器件的位置、高功率微波功率、能量、脉冲宽度、脉冲重复率等阈值进行数值判断。下面通过距离求解引信天线处的电场强度。

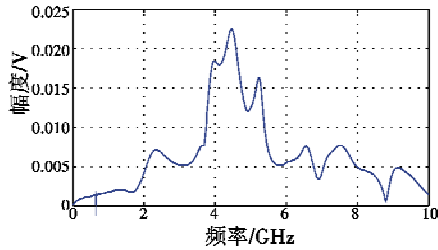


图 11 天线端口归一化感应电压

Fig. 11 Normalized induction voltage port

弹道导弹落地过程的几何关系如图 12 所示,其中假设 HPMW 放在弹头落点的前端。

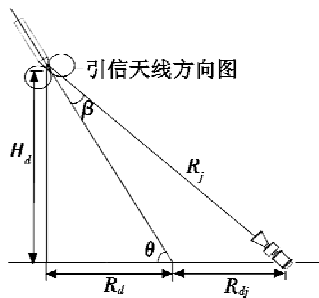


图 12 弹头落地过程中的几何关系

Fig. 12 Warhead landing geometric relationship

设弹头落地前引信接电,引信接电后距 HPMW 的距离为

$$R_j = \sqrt{H_d^2 + (R_d + R_{dj})^2} \quad (1)$$

式中: H_d 为弹头的高度; R_d 为引信接电瞬间位置与弹头落地点的水平距离; R_{dj} 为 HPMW 离弹头落点的距离。

引信与 UWBW 直线距离为 R_j , 则引信处场强为

$$E = \sqrt{\frac{\eta P_r G_r}{4\pi R_j^2}} \quad (2)$$

式中: P_r 为 HPMW 有效功率; G_r 为 HPMW 天线的增益; $\eta = 377 \Omega$ 。

导弹进入 HPMW 作用区,假设高度为 1000 m 时引信加电,最低爆高设定为 10 m。弹道落角 θ 为 60° , HPMW 离落点的最大距离 R_{dj} 为 100 m,根据式(1)、式(2)确定高度与场强。

假设接收天线效率为 0.5,从天线到开关的传输损耗为 6 dB,结合图 11 得到 PIN 器件前的感应电压与距离的关系如图 13 所示。

弹头高度在 58 m 内时加在 SDP06S60 PIN 二极管的反向感应电压大于 600 V,从电压方面已经具备了被击穿的条件;同样,在 332 m 内, SMP1352-005PIN 二极管也已经具备了被击穿的条件;从而能够对相应的

无线电引信形成毁伤。

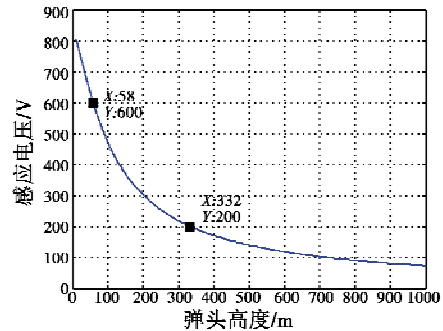


图 13 PIN 器件前的感应电压

Fig. 13 The induced voltage before PIN device

5 结束语

HPMW 的毁伤过程是通过天线耦合,经弹道导弹无线电引信天线进入系统内部并对接收通道重点元件的作用过程。以天线为主要仿真对象,求取其在该元件上的反向电压是研究 HPMW 毁伤过程的一种方法。针对无+线电引信,仿真表明,1 GW 的 HPMW 在 1000 m 以内,具备完全烧毁接收机前端器件的电压条件。

参考文献

- [1] 侯民胜. 无线电引信的电磁脉冲效应[J]. 航天电子对抗, 2009, 25(1): 4-6.
- [2] 王韶光, 魏光辉, 陈亚洲, 等. 无线电引信的超宽谱辐射效应及其防护[J]. 强激光与粒子束, 2007, 19(11): 1873-1879.
- [3] 张玲. 双极型半导体器件高功率微波损伤研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2008.
- [4] 熊波, 张小枫, 尚雅玲, 等. 高功率微波对线性调频无线电引信的作用效应[J]. 探测与控制学报, 2010, 32(6): 14-16.
- [5] 胡少飞. 高功率微波弹对雷达接收机保护器的毁伤[J]. 兵工自动化, 2009, 28(5): 23-25.
- [6] 余川, 胃逸, 文舸一. 电子系统微波接收截面的研究[J]. 强激光与离子束, 2001, 13(1): 101-105.
- [7] CAMP M, NITSCH D, SABATH F, et al. Susceptibility of some electronic equipment to HPEM threat [J]. System Design and Assessment Notes, 2004, 37: 380-389.
- [8] XU Jianfeng, YIN Wenyan, MAO Junfa. Thermal transient response of GaAs FETs under intentional electromagnetic interference (IEMI) [J]. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 2008, 50(2): 340-345.
- [9] 王莉军. 接收前端组件的研究与设计[D]. 成都: 电子科技大学, 2008.
- [10] 王世辉. S 波段高功率 T/R 组件的研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2005.